

Bodemverbeteraars met focus op biochar

Voorjaar 2016

Henk van Reuler; Ton Baltissen (Wageningen UR)

Meststoffen worden toegediend voor de levering van voedingsstoffen. Terwijl bodemverbeteraars als essentiële functie hebben, het verbeteren van de fysische en/of chemische en/of biologische eigenschappen van de bodem zoals, vochtvasthoudend vermogen, waterdoorlatendheid, structuur.

Bij het afbreken van de verbeteraars in de bodem kunnen ook voedingsstoffen vrijkomen.

Belangrijk doel van het toedienen van bodemverbeteraars is goede omstandigheden voor de wortelgroei te creëren. Om dit tot stand te brengen is een lange termijn strategie nodig (5 – 10 jaar).

Bodemverbeterende middelen worden gebruikt om de organische stof toestand, pH, de structuur of het bodemleven te verbeteren. De groep bodemverbeteraars is zeer divers.

Voorbeelden van bodemverbeteraars zijn:

Organische stof rijke producten

Compost, turf, veen

Kalkmeststoffen voor het verhogen van de pH en daardoor een effect invloed op de

Nutriëntenvoorziening en/of

Bodemstructuur en/of

Bodembiologie

Gips verbetering van de bodemstructuur

Specifiek op de activiteit van het bodemleven gericht zijn de toevoegmiddelen die bestaan uit micro-organismen en de preparaten die in de biologisch-dynamische landbouw worden gebruikt.

Vrij recent is de aandacht voor verschillende soorten steenmeel. Het zijn gemalen onverweerde gesteenten, die na toediening aan de bodem langzaam verweren waarbij voedingsstoffen vrijkomen.

Het probleem bij het onderzoek naar het effect van bodemverbeteraars is dat het onduidelijk is na hoeveel jaar je een meetbaar effect mag verwachten? Recent zijn de resultaten van een relatief lang lopend onderzoek naar bodemverbeteraars gerapporteerd (Schoutsen en van Balen, 2015).

Project Bodem- en structuurverbeteraars

In het project Bodem- en structuurverbeteraars zijn een 9-tal producten getest op hun effect op verandering van bodemkenmerken en gewasopbrengst op 5 locaties gedurende 6 jaar. Naast de proeven is ook uitgebreid gecommuniceerd over hoe om te gaan met bodemstructuur

Proefopzet

In de proef zijn de ontwikkeling van de gewasopbrengst, de gewaskwaliteit en de bodemeigenschappen gevolgd over een periode van zes jaar (2010-2015). De negen producten zijn vergeleken met drie referenties.

Referenties

Kunstmest;

Drijfmest plus kunstmest;

	<i>Groencompost plus kunstmest;</i>
Calcium en kalkmeststoffen	<i>AgriGyps:</i> Calciummeststof met sulfaat zonder pH verhogend effect; <i>Betacal Carbo:</i> Kalkmeststof met pH verhogend effect, reststroom van suiker-productie; <i>Brandkalk:</i> Kalkmeststof met magnesium, licht pH verhogend; <i>PRP-sol:</i> meststof op basis van minerale zouten, sporenelementen en organische extracten met calcium- en magnesiumcarbonaat;
Bodemleven stimulerende producten	<i>Condit 7%N:</i> product bestaande uit o.a. gehydroliseerde eiwitten en zeolieten; <i>Xurian Optimum:</i> meststof met borium, zink en een <i>Pseudomonas</i> -bacterie; <i>Bactofil:</i> Bacteriepreparaat in twee vormen voor monocotylen en voor dicotylen;
Overige producten	<i>Biochar:</i> product dat ontstaat bij verhitting van biomassa onder zuurstofloze omstandigheden; <i>Steenmeel:</i> gemalen vulkanisch gesteente in deze proef gericht op kali-levering.

Voor de dosering wordt verwezen naar

<http://www.kennisakker.nl/kenniscentrum/document/perspectief-van-bodemverbeteraars>

De proef is uitgevoerd op drie klei- en twee zandlocaties in verschillende delen van het land op percelen met een gemiddelde bodemkwaliteit. In 2010 is op alle proefvelden de uitgangssituatie van de bodem bepaald (nulmeting), zowel chemisch, fysisch als biologisch. In 2012 en 2015 zijn de bodemeigenschappen opnieuw bepaald.

De hoofdconclusie is dat de getoetste bodem- en structuurverbeteraars hadden in deze proefopzet slechts een beperkt effect op de gemeten fysische, chemische en biologische bodemparameters op zowel de klei- als zandlocaties. De toepassing van bodem- en structuurverbeteraars heeft niet geleid tot significant hogere opbrengsten dan de referenties kunstmest, kunstmest plus dierlijke mest of kunstmest plus compost.

Uiteraard komt de vraag naar voren of er wel effecten waren gevonden als de proef langer was voortgezet. Op dit moment is helaas zeer moeilijk om projecten uit te voeren die langer dan 3 jaar duren.

Van Os (2016) heeft recent een presentatie gegeven met als titel 'Bodemverbeteraars – Hoop of hype?' In de presentatie wordt vooral ingegaan op bodemverbeteraars die een effect hebben op het bodemleven. De resultaten zijn wisselend. Een belangrijke conclusie is dat de ondernemer die interesse heeft in of deze al gebruikt bewust met de bodem bezig is en Van Os ziet dit als een belangrijk winstpunt.

<https://www.youtube.com/watch?v=I9r-9t3u9m4>

Biochar

Wat is biochar? Biochar is een stabiele organische verbinding die hoofdzakelijk uit koolstof bestaat. Het ontstaat bij verhitting van biomassa onder zuurstofloze omstandigheden, z.g. pyrolyse.

Houtskool is een bekend voorbeeld. Het belangrijkste verschil tussen houtskool en biochar is het doel waarvoor het geproduceerd wordt. Houtskool wordt gebruikt als brandstof terwijl biochar wordt geproduceerd als bodemverbeteraar.

Voor de houtskool productie wordt veelal hout als grondstof gebruikt. Voor de productie van biochar kunnen vele organische stoffen worden gebruikt: snoeiafval, energiegewassen en reststromen van verwerkende industrieën. Bij de verhitting ontstaan gasvormige en vloeibare brandstofmengsels van koolstofmonoxide, koolstofdioxide en waterstof. Daarnaast blijft biochar over. Naast de gebruikte grondstof bepaalt ook het productieproces de samenstelling van de biochar (Tabel).

Er is veel belangstelling voor Biochar. Het gaat hierbij dan om twee belangrijke toepassingen:

- Vastlegging van koolstof;
- Verbeteren van bodemeigenschappen.

Tabel 2. Typische opbrengst behaald met verschillende pyrolyse omstandigheden op basis van hout; naar Bridgewater (2007) en Verheijen et al. (2010)

Toepassing	Omstandigheden	Olie (%)	Biochar (%)	Gas (%)
Fast	Gemiddelde temperatuur (~500°C) Korte verblijftijd (~1sec)	75	12	13
Moderate	Gemiddelde temperatuur (~500°C) Gemiddelde verblijftijd (~10-20sec)	50	20	30
Slow (Carbonisation)	Lage temperatuur (~400°C) Zeer lange verblijftijd (~5min-uren)	30	35	35
Gasification	Hoge temperatuur (>750°C) Lange verblijftijd (5-30min)	5	10	85

Effect van Biochar op de bodemeigenschappen

De discussie gaat om het effect van Biochar toediening op een aantal bodemfuncties, zoals b.v. het vermogen om vocht en voedingsstoffen vast te houden, biologische activiteit. De beschikbare resultaten zijn vrijwel alleen afkomstig van onderzoeken met een relatief beperkte looptijd.

Hierbij wordt vooral gerefereerd aan de goede eigenschappen van 'zwarte' bodems in het Amazone gebied, Brazilië. Deze bodems liggen vlakbij nederzettingen waar jarenlang huishoudelijk afval is opgebracht. Dit afval bevatte ook resten van het houtvuur, as en houtskool. Na veel jaren krijg je dan een dikke donkere bovengrond met gunstige eigenschappen. Deze bodems zijn vaak met succes in gebruik voor de teelt van bijv. groenten.

Terra Preta bodems in de Amazone

Het viel de Wageningse bodemkundige Sombroek bij zijn onderzoek in Amazone in de jaren '60 op dat sommige bodems veel vruchtbaarder waren dan de algemeen voorkomende rode en gele bodems.

Hij noemde de vruchtbare bodems Terra Preta (zwarte bodems) of ook wel 'Indianengronden' omdat ze veelal dichtbij (voormalige) dorpjes voorkomen. De dikke donkere bovengrond heeft een hoog organische stof gehalte en bevat ook potscherven. Deze zijn duizenden jaren geleden ontstaan door regelmatige toediening van huishoudelijk afval aan de bodem. Het viel Sombroek op dat de gewasopbrengsten op deze Terra Preta veel hoger was dan op vergelijkbare bodems op grotere afstand van de nederzettingen.

In Tabel staan een aantal chemische eigenschappen vergeleken met een referentie bodem.

Tabel 1. Chemische eigenschappen van Terra Preta bodems in het Amazonegebied; naar Novotny et al. (2009)

	pH	CEC (cmol kg ⁻¹)	Ca+Mg (cmol kg ⁻¹)	P (mg kg ⁻¹)
Controle	4.4	9.5	1.3	5
Terra Preta	5.4	17.3	6.8	300

Begin 2000 ontstond het idee dat het verhogen van het organische stof gehalte door het toedienen van houtskool de vruchtbaarheid van arme bodems zou kunnen verhogen. Daarnaast wordt op deze wijze ook veel CO₂ vastgelegd. Men noemde dit het Terra Preta Nova experiment.

Sinds die tijd zijn er op vele locaties experimenten uitgevoerd.

Effect van de toediening van biochar op de bodemeigenschappen

De bodemvruchtbaarheid (=landbouwkundige bodemkwaliteit) wordt bepaald door de fysische-, chemische- en biologische bodemeigenschappen.

Chemische bodemeigenschappen = pH; nutriënten leverend en bindend vermogen;

Fysische bodemeigenschappen = structuur, vochtvasthoudend vermogen;

Biologische bodemeigenschappen = activiteit van het bodemleven.

Het vochtvasthoudend vermogen wordt positief beïnvloed door Biochar toediening in zandige bodems. Hiervoor moeten dan wel grote hoeveelheden (45 vol%) Biochar worden toegediend. In bodems met een zwaardere textuur is geen effect gevonden (Verheijen et al., 2010).

Biologische eigenschappen

Biochar is poreus en heeft een groot specifiek oppervlak. Allerlei micro-organismen kunnen zich vestigen in de poriën. Toediening leidt tot toename van microbiële biomassa en activiteit. De toename lijkt af te hangen van de nutriëntenbeschikbaarheid. Het aantal wormen en ook de activiteit nam toe na toediening van grote hoeveelheden Biochar.

Biochar bevat weinig nutriënten. Een toename van de nutriëntenbeschikbaarheid zal een gevolg moeten zijn van interactie met andere bodembestanddelen. Biochar verhoogt de pH en daarmee in een aantal gevallen, als er sprake is van een pH afhankelijke CEC zoals in tropische bodems, het nutriëntenbindend vermogen van kationen (CEC). Ook kan Biochar allerlei chemische stoffen zoals herbiciden en pesticiden binden en daarmee voorkomen dat deze (nog) niet in het grondwater terechtkomen.

Biochar kwaliteit

De grondstoffen gebruikt voor de productie van biochar en het productieproces zelf kunnen leiden tot verontreinigd eindproduct dat een gevaar voor de gezondheid kan zijn. Voorbeelden van verontreinigingen zijn: organische verbindingen met chloor (PCBs), Polycyclische koolwaterstoffen (PAKs), dioxinen en verschillende zware metalen.

Er zijn verschillende certificeringregelingen voorgesteld voor het waarborgen van de Biochar kwaliteit. De EU zet drempelwaarden voor verontreinigende stoffen in bodemverbeteraars zoals compost. Deze waarden gelden ook voor Biochar.

Verheijen et al. (2010) geven een aantal voorbeelden waarin het productieproces het gehalte aan verontreinigingen beïnvloed. Houtskool komt op grote schaal in bodems voor. Op dit moment zijn er geen voorbeelden bekend waarbij houtskool nadelige effecten op het milieu heeft. De auteurs geven aan dat de toediening van Biochar aan de bodem onomkeerbaar is en daarom de samenstelling zeer belangrijk is. Daarnaast wordt gewaarschuwd voor Biochar productie onder niet of slecht gecontroleerde omstandigheden. Speciaal wordt als voorbeeld de kleinschalige productie on-farm productie genoemd.

De vraag is onder welke omstandigheden is er een positief effect op de bodemvruchtbaarheid van toediening van Biochar te verwachten onder Nederlandse omstandigheden .

In Nederland zijn de oude bouwlanden (esgronden of enkeerdgronden) op ongeveer dezelfde manier ontstaan. Hier is alleen potstalmest opgebracht i.p.v. huisvuil.

In Tabel 1 staat een vergelijking tussen tropische en Nederlandse bodems.

Nederlandse bodems

Chemisch lijkt het pH verhogende effect het belangrijkste te zijn. Dit zou van belang kunnen zijn op de zure dekzandgronden (pH<5).

Het positieve effect op het vochtvasthoudend vermogen kan op zowel dek- als duinzandgronden van belang zijn. In het door Verheijen et al. (2009) geciteerd onderzoek uit 1948 is bij een toediening van 45 vol.% (!) Biochar een toename van 18% vocht gerealiseerd. In lemige bodems werd geen effect gevonden.

In Nederlandse bodems wordt geen toename van de CEC verwacht omdat de pH afhankelijke CEC laag is dit i.t.t. tropische bodems waar dit effect wel werd gevonden.

Het effect op de biologische omstandigheden lijkt naast de pH verhoging het duidelijkst. Er is een toename van de mycorrhiza en regenwormen gevonden. Voor de mycorrhiza toename worden drie redenen gegeven:

- verandering van de fysische en chemische bodemomstandigheden;

- het is een indirect effect omdat andere micro organismen worden beïnvloed;
- binding van giftige stoffen aan de Biochar;
- poriën bieden een schuilplaats.

Tabel 1. Vergelijking van eigenschappen van bodems uit de natte tropen met bodems uit Nederland.

	Tropische bodems (natte tropen)	Nederlandse bodems
Algemeen	Zeer oud sterk verweerd, behalve in gebieden met actieve vulkanen (Java!)	Relatief jonge afzettingen: dek/duinzand, rivier/zee klei, löss
Chemische bodemvruchtbaarheid	Door verwerking en uitspoeling weinig nutriënten beschikbaar (chemisch arm), dunne bovengrond met weinig organische stof. Lage pH (veel Al) en CEC	Nutriënten kunnen uit mineralen vrijkomen en afbraak organische stof, pH veelal neutraal, CEC goed
Fysische -	Goede structuur en goede waterdoorlatendheid. (Zeer) diepe grondwaterstand Vochtvasthoudend minder belangrijk vanwege de vele regen	Structuur afhankelijk van type bodem Veelal grondwater binnen 1.5 m Vochtvasthoudend vermogen afhankelijk textuur en organische stof gehalte. Laag in zandgronden, goed in kleigronden
Biologische -	Veelal actief bodemleven	Wisselend o.a. afhankelijk grondwaterstand
Menselijke invloed	Oppervlakkige grondbewerking laag gebruik van organische/kunstmest Weinig/geen gebruik van biociden	Mechanische grondbewerking Toediening van grote hoeveelheden organische/kunstmest Gebruik van biociden

Regenwormen activiteit en aantal namen toe als grote hoeveelheden Biochar werden toegediend. Er blijven nog veel vragen over. Met name over de rol van geproduceerde Biochar toegediend aan bodems in de gematigde streken in relatie tot de gebruikte grondstoffen voor de productie van Biochar, de regionale omstandigheden en teeltmanagement.

Om als bodemverbeteraar te gebruikt te worden moet Biochar aan een aantal voorwaarden voldoen:

- Heeft alle Biochar dezelfde eigenschappen;
- Is Biochar veilig te gebruiken;
- Wat zijn de landbouwkundige voordelen;
- Is gebruik economisch haalbaar;
- Wat is wettelijk toegestaan?

Het meeste effect lijkt te verwachten op de biologische bodemvruchtbaarheid, m.n. de mycorrhiza's etc. Een ander mogelijk belangrijk aspect onder Nederlandse omstandigheden kan de binding van chemische middelen zijn die zich in de bodem bevinden.

Verheijen et al., (2009) heeft een overzicht gemaakt van de effecten van biochar toediening op de bodemeigenschappen, processen in en functies van de bodem. In Bijlage 1 staan de positieve, negatieve en nog onbekende effecten van biochar toediening.

Biochar studies in Europa

Ook in Europa zijn studies naar de effecten van de toediening van biochar uitgevoerd. O.a. in het INTERREG 'Biochar: climate saving soils' dat in december 2013 is afgesloten met een bijeenkomst in Groningen (<http://www.biochar-interreg4b.eu/>).

Op deze bijeenkomst geeft Kor Zwart een presentatie over de functies van biochar in de bodem en hij komt tot de volgende conclusies:

- Biochar can be used to sequester short cyclic C in the soil
- Fresh biochar is rather different from SOM
- It seems rather unlikely that (fresh) biochar can completely replace SOM
- Modification of biochar to improve its functionality is needed and possible

De hoge verwachtingen van de toediening worden veelal niet waar gemaakt. Een belangrijke oorzaak is dat biochar bestaat uit alleen inerte organische stof terwijl organisch afval bestaat uit verschillende materialen. Uiteraard wordt er wel koolstof vastgelegd in de bodem bij toediening van biochar.

Ook was er geen effect van biochar op de gewasopbrengsten zoals Greet Ruyschaert in haar bijdrage liet zien. De veldproeven werden in Denemarken, Noorwegen, België, Schotland, Duitsland en Zweden uitgevoerd. Haar conclusies:

- Pure biochar additions in open fields mostly do not lead to crop yield effects in Europe
- Positive effects can be achieved from 10 ton/ha
- Risks at higher biochar doses (biochar dependent)
- C sequestration strategy
- Research needs
 - Longer term effects on soil and crop
 - Non-wood based biochars
 - Biochars from alternative technologies (e.g., gasification)
 - Degraded land
 - Alternative uses: e.g., combined biochar-organic material amendment, growing media

Romke Postma onderzocht het gebruik van biochar als bodemverbeteraar onderzocht. In een veldproef is het effect van verschillende bodemverbeteraars (kalkmeststoffen, micro-organismen en compost) vergeleken met het effect van biochar. Zijn conclusies:

- In field experiments in NL the effect of biochar was not better or worse than other, regular soil conditioners
 - Crop yield and quality
 - Soil quality
- At the long term (decades), repeated applications of biochar will lead to increased C contents in the soil. This effect is larger than with compost.
- The perspectives of biochar depend on agricultural value, environmental effects and price → still unsure
- In farm management, biochar could be part of a strategy to keep organic C contents at a desired level → still unsure if biochar will behave like SOM

Het verschil tussen biochar en organische stof

Zwart (2013) geeft aan dat

- Biochar = organic carbon
- SOM = organic carbon
- Biochar ≠ SOM

Wat is dan het belangrijkste verschil?

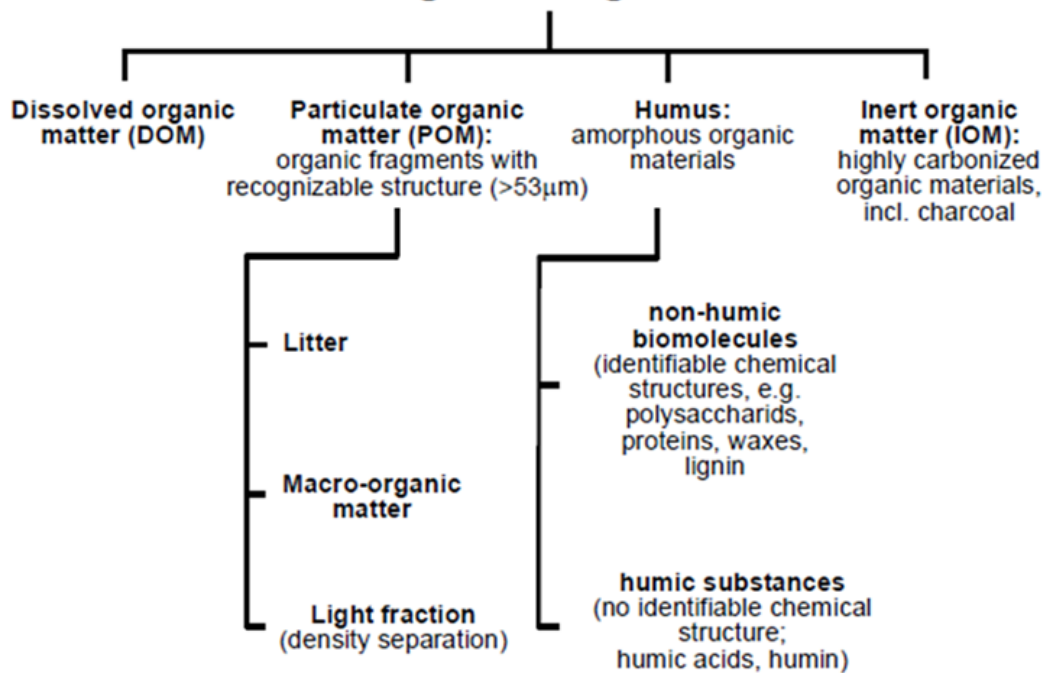
Het uitgangsmateriaal van organische stof in de bodem is vers organisch materiaal zoals oogsten plantenresten, compost, mest, enz. Dit organische materiaal wordt in de bodem door micro-organismen afgebroken. Wanneer dit verse organische materiaal door de afbraak onherkenbaar is geworden, spreken we van organische stof in de bodem. Organische stof is een complex mengsel van koolstofhoudende verbindingen en bestaat voor ± 58% uit organische koolstof.

Bij de bepaling van het organische stof gehalte bepaalt men in feite de hoeveelheid organische koolstof (C) en men berekent dan de hoeveelheid organische stof. De omrekeningsfactor varieert van 1.4 - 3.3. De meest gebruikte factor is echter 1.72.

Bij gebruik te maken van een vaste omrekeningsfactor gaat men ervan uit dat de samenstelling van organische stof min of meer constant is terwijl in de praktijk grote verschillen kunnen bestaan.

Om een beter vergelijking mogelijk te maken zou het beter zijn het organisch C gehalte te gebruiken i.p.v. het organische stof gehalte. In België is dit gebruikelijk.

Non-living soil organic matter



Composition of soil organic matter (modified from Baldock and Skjemstad, 1999).

Een gebruikelijke indeling van de organische koolstof in verschillende fracties wordt getoond in Fig. Deze fracties hebben verschillende eigenschappen en ook verschillende afbreeksnelheden. Het gaat hierbij om:

- Opgeloste organische stof (DOM) deeltjes < 0.45 µm
- Fijn verdeelde organische stof (POM) deeltjes met een herkenbare structuur > 53 µm en uit een lichte fractie die weer onderscheiden kan worden m.b.v. scheidingstechnieken of basis van dichtheid
- Humus veelal het grootste deel van de organische stof
- Inerte organische stof (IOM) v.b. houtskool

Biochar bestaat voor een belangrijk deel uit inerte organische koolstof terwijl organische stof uit verschillende fracties bestaat die ook verschillende eigenschappen hebben. Dit betekent dat biochar ook maar een deel van de functies kan vervullen die organische stof in de bodem heeft. Nijland (2014) geeft aan de samenstelling van Biochar aan die indianen eeuwenlang aan de bodems in de Amazone hebben toegediend. Terwijl voor de op dit moment geproduceerd Biochar slecht een of enkel reststromen worden geproduceerd. De samenstelling wijkt dan ook af van de 'indianen' Biochar.



Figuur . Ontstaan van de Terra Preta bodems in het Amazonegebied (Nijland, 2014).

Conclusies

Er zijn twee waarschijnlijke oorzaken waarom in Europese studies slechts geringe effecten van de toediening van biochar op de bodemeigenschappen en gewasopbrengsten zijn gevonden in vergelijking tot de effecten van toediening in het Amazone gebied.

In de meeste studies wordt gebruik gemaakt van biochar gemaakt van slechts een of enkele reststromen. Het gevolg is een product met eenzijdige samenstelling dat grotendeels uit inerte koolstof bestaat. Dit in tegenstelling tot het product dat in de Amazone is toegediend aan de bodem. Deze biochar bestaat uit een mengsel van verschillende afvalproducten (Fig.) met verschillende eigenschappen.

Daarnaast is de natuurlijke vruchtbaarheid van de bodems in het Amazone gebied veel lager dan die van de veel bodems in Europa, m.n. in Nederland. Een belangrijke oorzaak voor dit verschil is de ouderdom van de bodems. Een relatief kleine toediening van 'biochar' heeft een relatief groot effect.

In feite is de aanduiding Biochar voor een product gemaakt van een of meerder reststromen een te algemene aanduiding. Beter is de materialen waaruit de Biochar is gemaakt aan te geven.

Daarnaast is het belangrijk de productieomstandigheden te controleren en daarmee te voorkomen dat er een verontreinigd eindproduct wordt gemaakt.

Referenties

<http://www.biochar-interreg4b.eu/>

PDFs van de volgende powerpoint presentaties

Kor Zwart - Key functions of biochar in soil

Greet Ruyschaert - Field trials with biochar in the North Sea Region

Romke Postma - Perspectives of biochar as a soil conditioner

Krull E.S., J. O. Skjemstad and J. A. Baldock, 2010. Functions of Soil Organic Matter and the Effect on Soil Properties. CSIRO Land & Water (<http://grdc.com.au/uploads/documents/cso000291.pdf>)

van Os, G. 2016. Bodemverbeteraars – Hoop of hype?

<https://www.youtube.com/watch?v=I9r-9t3u9m4>

Schoutsen M.A. en D.J.M. van Balen (Red.) 2015. Effecten bodem- en Structuurverbeteraars. Onderzoek op klei- en zandgrond 2010-2015. Eindrapportage Wageningen UR.

<http://www.kennisakker.nl/kenniscentrum/document/perspectief-van-bodemverbeteraars>

Verheijen, F.G.A., Jeffery, S., Bastos, A.C., van der Velde, M., and Dias, I., 2009. Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. EUR 24099 EN, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 149 pp.

(http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/ESDB_Archive/eusoils_docs/other/EUR24099.pdf)

Nijland, Rik, 2014. Zoektocht naar de werking van biochar. Indianenverhalen over zwarte grond. Wageningen World 01-2014, p.34-39.

Bijlage 1. Positieve, negatieve en nog onbekende effecten op bodemeigenschappen ten gevolge van Biochar toediening. De nummers refereren in de hoofdstukken in Verheijen et al.(2009).

	Description	Conditions
Positives	Empirical evidence of charcoal in soils exists (long term)	Biochar analogues (pyrogenic BC and charcoal) are found in substantial quantities in soils of most parts of the world (1.2-1.4)
	The principle of improving soils has been tried successfully in the past	Anthrosols can be found in many parts of the world, although normally of very small spatial extent. Contemplation of Anthrosol generation at a vast scale requires more comprehensive, detailed and careful analysis of effects on soils as well as interactions with other environmental components before implementation (1.2-1.3 and throughout)
	Plant production has been found to increase significantly after biochar addition to soils	Studies have been reported almost exclusively from tropical regions with specific environmental conditions, and generally for very limited time periods, i.e. 1-2 yr. Some cases of negative effects on crop production have also been reported (3.3).
	Liming effect	Most biochars have neutral to basic pH and many field experiments show an increase in soil pH after biochar application when the initial pH was low. On alkaline soils this may be an undesirable effect. Sustained liming effects may require regular applications (3.1.4)
	High sorption affinity for HOC may enhance the overall sorption capacity of soils towards these trace contaminants	Biochar application is likely to improve the overall sorption capacity of soils towards common anthropogenic organic compounds (e.g. PAHs, pesticides and herbicides), and therefore influence toxicity, transport and fate of such contaminants. Enhanced sorption capacity of a silt loam for diuron and other anionic and cationic herbicides has been observed following incorporation of biochar from crop residues (3.2.2)
	Microbial habitat and provision of refugia for microbes whereby they are protected from grazing	Biochar addition to soil has been shown to increase microbial biomass and microbial activity, as well as microbial efficiency as a measure of CO ₂ released per unit microbial biomass C. The degree of the response appears to be dependent on nutrient availability in soils
	Increases in mycorrhizal abundance which is linked to observed increases in plant productivity	Possibly due to: a) alteration of soil physico-chemical properties; b) indirect effects on mycorrhizae through effects on other soil microbes; c) plant-fungus signalling interference and detoxification of allelochemicals on biochar; or d) provision of refugia from fungal grazers (3.2.6)
	Increases in earthworm abundance and activity	Earthworms have been shown to prefer some soils amended with biochar than those soils alone. However, this is not true of all biochars, particularly at high application rates (3.2.6)
	The use of biochar analogues for assessing effects of modern biochars is very limited	Charcoal in Terra Preta soils is limited to Amazonia and have received many diverse additions other than charcoal. Pyrogenic BC is found in soils in many parts of the world but are of limited feedstock types and pyrolysis conditions (Chapter 1)

Negatives	Soil loss by erosion	Top-dressing biochar to soil is likely to increase erosion of the biochar particles both by wind (dust) and water. Many other effects of biochar in soil on erosion can be theorised, but remain untested at present (4.1)
	Soil compaction during application	Any application carries a risk of soil compaction when performed under inappropriate conditions. Careful planning and management could prevent this effect (4.6)
	Risk of contamination	Contaminants (e.g. PAHs, heavy metals, dioxins) that may be present in biochar may have detrimental effects on soil properties and functions. The occurrence of such compounds in biochar is likely to derive from either contaminated feedstocks or the use of processing conditions that may favour their production. Evidence suggests that a tight control over the type of feedstock used and lower pyrolysis temperatures (<500°C) may be sufficient to reduce the potential risk for soil contamination (3.2.4)
	Residue removal	Removal of crop residues for use as a feedstock for biochar production can forego incorporation of the crop residue into the soil, potentially leading to multiple negative effects on soils (3.2.5.5)
	Occupational health and fire hazards	Health (e.g. dust exposure) and fire hazards associated to the production, transport, application and storage of biochar need to be considered when determining the suitability for biochar application. In the context of occupational health, tight health and safety measures need to be put in place in order to reduce such risks. Some of these measures have already proved adequate (5.2)
	Reduction in earthworm survival rates (limited number of cases)	High biochar application rates of >67 t ha ⁻¹ (produced from poultry litter) were shown to have a negative effect on earthworm survival rates, possibly due to increases in pH or salt levels (3.2.6)
Unknown	Empirical evidence is extremely scarce for many modern biochars in soils under modern arable management	Biochar analogues do not exist for many feedstocks, or for some modern pyrolysis conditions. Biochar can be produced with a wide variety of properties and applied to soils with a wide variety of properties. Some short term (1-2 yr) evidence exists, but only for a small set of biochar, environmental and soil management factors and almost no data is available on long term effect (1.2-1.4)
	C Negativity	The carbon storage capacity of biochar is widely hypothesised, although it is still largely unquantified and depends on many factors (environmental, economic, social) in all parts of the life cycle of biochar and at the several scales of operation (1.5.2 and Chapter 5)
	Effects on N cycle	N ₂ O emissions depend on effects of biochar addition on soil hydrology (water-filled pore volume) and associated microbial processes. Mechanisms are poorly understood and thresholds largely unknown (1.5.2)
	Biochar Loading Capacity (BLC)	BLC is likely to be crop as well as soil dependent leading to potential incompatibilities between the irreversibility of biochar once applied to soil and changing crop demands (1.5.1)
	Environmental behaviour	The extent and implications of the changes that biochar undergoes in soil remain largely unknown. Although biochar physical-chemical
	mobility and fate	properties and stabilization mechanisms may explain biochar long mean residence times in soil, the relative contribution of each factor for its short- and long-term loss has been sparsely assessed, particularly when influenced by soil environmental conditions. Also, biochar loss and mobility through the soil profile and into the water resources has been scarcely quantified and transport mechanisms remain poorly understood (3.2.1)
	Distribution and availability of contaminants (e.g. heavy metals, PAHs) within biochar	Very little experimental evidence is available on the short- and long-term occurrence and bioavailability of such contaminants in biochar and biochar-enriched soil. Full and careful risk assessment in this context is urgently required, in order to relate the bioavailability and toxicity of the contaminant to biochar type and 'safe' application rates, biomass feedstock and pyrolysis conditions, as well as soil type and environmental conditions (3.2.4)
	Effect on soil organic matter dynamics	Various relevant processes are acknowledged but the way these are influenced by combinations of soil-climate-management factors remains largely unknown (Section 3.2.5)

Continued

Unknown	Empirical evidence is extremely scarce for many modern biochars in soils under modern arable management	Biochar analogues do not exist for many feedstocks, or for some modern pyrolysis conditions. Biochar can be produced with a wide variety of properties and applied to soils with a wide variety of properties. Some short term (1-2 yr) evidence exists, but only for a small set of biochar, environmental and soil management factors and almost no data is available on long term effect (1.2-1.4)
	C Negativity	The carbon storage capacity of biochar is widely hypothesised, although it is still largely unquantified and depends on many factors (environmental, economic, social) in all parts of the life cycle of biochar and at the several scales of operation (1.5.2 and Chapter 5)
	Effects on N cycle	N ₂ O emissions depend on effects of biochar addition on soil hydrology (water-filled pore volume) and associated microbial processes. Mechanisms are poorly understood and thresholds largely unknown (1.5.2)
	Biochar Loading Capacity (BLC)	BLC is likely to be crop as well as soil dependent leading to potential incompatibilities between the irreversibility of biochar once applied to soil and changing crop demands (1.5.1)
	Environmental behaviour	The extent and implications of the changes that biochar undergoes in soil remain largely unknown. Although biochar physical-chemical
	mobility and fate	properties and stabilization mechanisms may explain biochar long mean residence times in soil, the relative contribution of each factor for its short- and long-term loss has been sparsely assessed, particularly when influenced by soil environmental conditions. Also, biochar loss and mobility through the soil profile and into the water resources has been scarcely quantified and transport mechanisms remain poorly understood (3.2.1)
	Distribution and availability of contaminants (e.g. heavy metals, PAHs) within biochar	Very little experimental evidence is available on the short- and long-term occurrence and bioavailability of such contaminants in biochar and biochar-enriched soil. Full and careful risk assessment in this context is urgently required, in order to relate the bioavailability and toxicity of the contaminant to biochar type and 'safe' application rates, biomass feedstock and pyrolysis conditions, as well as soil type and environmental conditions (3.2.4)
	Effect on soil organic matter dynamics	Various relevant processes are acknowledged but the way these are influenced by combinations of soil-climate-management factors remains largely unknown (Section 3.2.5)
	Pore size and connectivity	Although pore size distribution in biochar may significantly alter key soil physical properties and processes (e.g. water retention, aeration, habitat), experimental evidence on this is scarce and the underlying mechanisms can only be hypothesised at this stage (2.3 and 3.1.3)
	Soil water retention/availability	Adding biochar to soil can have direct and indirect effects on soil water retention, which can be short or long lived, and which can be negative or positive depending on soil type. Positive effects are dependent on high applications of biochar. No conclusive evidence was found to allow the establishment of an unequivocal relation between soil water retention and biochar application (3.1.2)
	Soil compaction	Various processes associated with soil compaction are relevant to biochar application, some reducing others increasing soil compaction. Experimental research is lacking. The main risk to soil compaction could probably be reduced by establishing a guide of good practice regarding biochar application (3.1.1 and 4.6)
	Priming effect	Some inconclusive evidence of a possible priming effect exists in the literature, but the evidence is relatively inconclusive and covers only the short term and a very restricted sample of biochar and soil types (3.2.5.4)

Continued

Effects on soil megafauna	Neither the effects of direct contact with biochar containing soils on the skin and respiratory systems of soil megafauna are known, nor the effects of ingestion due to eating other soil organisms, such as earthworms, which are likely to contain biochar in their guts (3.2.6.3)
Hydrophobicity	The mechanisms of soil water repellency are understood poorly in general. How biochar might influence hydrophobicity remains largely untested (3.1.2.1)
Enhanced decomposition of biochar due to agricultural management	It is unknown how much subsequent agricultural management practices (planting, ploughing, etc.) in an agricultural soil with biochar may influence (accelerate) the disintegration of biochar in the soil, thereby potentially reducing its carbon storage potential (3.2.3)
Soil CEC	There is good potential that biochar can improve the CEC of soil. However, the effectiveness and duration of this effect after addition to soils remain understood poorly (2.5 and 3.1.4)
Soil Albedo	That biochar will lower the albedo of the soil surface is fairly well established, but if and where this will lead to a substantial soil warming effect is untested (3.1.3)
